第 51 卷 第 7 期 金属学报 Vol.51 No.7
2015 年 7 月 第844-852页 ACTA METALLURGICA SINICA Jul. 2015 pp.844-852

脉冲磁场作用下矩形截面宽厚比对K4169高温合金晶粒细化的影响*

滕跃飞 李应举 冯小辉 杨院生

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要 研究了脉冲磁场作用下K4169高温合金矩形截面试件的凝固组织以及具有不同宽厚比矩形截面试件的晶粒细化效果, 计算模拟了脉冲磁场作用下试件熔体中电磁场和流场的分布情况, 并对细化机理进行了分析. 实验结果表明, 施加脉冲磁场后, K4169高温合金矩形试件的凝固组织得到了不同程度的细化, 当试件宽厚比为1时, 施加脉冲磁场可以使凝固组织晶粒显著细化; 随着试件宽厚比增大, 脉冲磁场的晶粒细化效果减弱. 计算模拟结果表明, 脉冲磁场在熔体中产生周期性的压-拉电磁力, 导致熔体产生周期性振荡和呈环流形式的对流. 在相同磁感应强度的脉冲磁场作用下, 试件宽厚比越接近1, 试件内的电磁力和流速越大, 有利于模壁晶核游离及枝晶臂破碎, 从而使晶粒得到细化.

关键词 高温合金, 晶粒细化, 脉冲磁场, 宽厚比, 数值模拟

中图法分类号 TG290 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2015)07-0844-09

EFFECT OF RECTANGLE ASPECT RATIO ON GRAIN REFINEMENT OF SUPERALLOY K4169 UNDER PULSED MAGNETIC FIELD

TENG Yuefei, LI Yingju, FENG Xiaohui, YANG Yuansheng

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

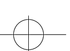
Correspondent: YANG Yuansheng, professor, Tel: (024)23971728, E-mail: ysyang@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51034012) and National Basic Research Program of China (No.2010CB631205)

Manuscript received 2014-12-16, in revised form 2015-03-24

ABSTRACT The researches on the grain refinement by applied pulsed magnetic field (PMF) during solidification have received much attention in recent years and lots of positive experimental results indicate that it is a potential method for controlling solidification process. Various grain refinement mechanisms under PMF are proposed and most of them are considered to be relevant to the convection of melt driven by the electromagnetic force. An obvious fact is that the forced convection caused by PMF is strongly limited by the shape of the melt. However, most of previous studies were focused on the cylindrical samples rather than rectangular ones, and actually the later one was widely used in industry. The aim of this work is to investigate the influence of PMF on the grain refinement of K4169 superalloy rectangular samples with various aspect ratios. Grain refinement of K4169 superalloy under PMF was experimentally investigated in the rectangular samples with the aspect ratios of 1.0, 2.0, 4.5 and 5.5 on the transverse section. In order to study the influence of aspect ratio on the forced convection, the distributions of the electromagnetic field, electromagnetic force and melt flow caused by PMF were numerically simulated by finite element software ANSYS. The experimental results show that the grains of the K4169 rectangular samples are coarse equaxied grains without PMF and the grain size slightly decreases with the increase of aspect ratio . Under

* 国家自然科学基金项目 51034012 和国家重点基础研究发展计划项目 2010CB631205 资助
收到初稿日期: 2014-12-16, 收到修改稿日期: 2015-03-24
作者简介: 滕跃飞, 男, 1986年生, 博士生
DOI: 10.11900/0412.1961.2014.00692



the PMF with same excitation voltage and frequency, the grains are refined remarkably in the sample with the aspect ratio of 1.0. As the aspect ratio is increased, the grain refinement effect can still be observed but not such obvious. The numerical simulation results indicate that the periodic pushing-pulling electromagnetic force is induced by the PMF, which drives the melt to vibrate and flow circularly. Under the same PMF, the electromagnetic force and fluid rate decreases with the increase of aspect ratio. When the aspect ratio increases from 1.0 to 5.5, the average electromagnetic force and fluid rate in the melt is reduced to 40% and 60%, respectively. The strongest fluid flow and vibration occur in the sample with section aspect ratio 1.0 in the present experiment, which is beneficial for grain refinement due to detachment of the solidified nuclei from mould wall and the break of dendrite arms from dendrite trunks.

KEY WORDS superalloy, grain refinement, pulsed magnetic field, aspect ratio, numerical simulation

使用熔模精密铸造的方式生产高温合金铸件,可以显著降低制造成本,提高铸件的可靠性和使用寿命. 但熔模铸造生产的铸件,其内部晶粒组织往往比较粗大,降低了铸件的综合力学性能,特别是低周疲劳性能[1]. 目前,实际生产中常采用降低浇注温度和加入表面细化剂的方法来细化铸件凝固组织[2,3]. 但是降低浇注温度的方法使得熔体流动性减小,不利于充型;加入表面细化剂可以使铸件表面晶粒得到明显细化,但是对于厚壁铸件内部的凝固组织细化效果一般,且容易引入夹杂. 21世纪以来,电磁搅拌和振荡技术[4,5]作为细化晶粒的一种方法得到了越来越多的关注,大量的研究结果表明,在铝合金[6,7]、镁合金[8]和钢铁[9]的凝固过程中施加电磁场可以显著细化其凝固组织. 若能使用电磁场细化高温合金的凝固组织,对于提升高温合金铸件性能很有意义. 金文中等[10]研究表明,在K417高温合金真空熔铸的凝固过程中施加电磁场可以使铸锭的等轴晶组织得到明显细化和增加,中心缩孔及疏松得到良好改善,枝晶偏析程度大幅度减轻,铸锭质量得到大幅提高. Jin等[11]对比研究了IN100合金铸造过程中电磁场与细化剂的作用,结果表明,施加合适参数的电磁场可以明显细化凝固组织,在熔模表面加入细化剂可以进一步加强细化作用. 贾鹏等[12]系统研究了电磁场频率及强度对Inconel625合金晶粒细化的影响,结果表明,在电流为100 A,频率为5~8 Hz时,高温合金的凝固组织可以得到明显细化. 本课题组前期研究工作[13~15]将低压脉冲磁场作用于K417和IN718高温合金的凝固过程中,结果表明,低压脉冲磁场具有显著的晶粒细化效果,并表明综合考虑脉冲磁场参数和热参数能够获得最佳的细化效果.

研究表明,电磁场在铸件中产生的电磁力和对流效应是细化晶粒的重要原因[16,17],但是电磁场在非轴对称形状的铸件(如方坯)中的电磁力分布及流动形式与在轴对称圆柱形铸件中差别很大. 如Zhang等[18,19]对圆柱形熔体中电磁场、流体流动及传热耦合的数值模拟结果表明,在轴对称的纵截面上存在着环流形式的熔体流动,但在横截面上不存在熔体流动. 任兵芝等[20]对方坯连铸过程中的电磁场和流场进行的研究则表明,电磁场在铸坯水平面上产生漩涡形式的流场,且切向速度大小与到中心的距离成正比,在纵截面上钢液的流动呈现4个漩涡. 俞建威等[21]研究了交变电磁场作用下不同宽厚比矩形件所受的电磁压力,模拟和实验结果都表明感应器在角部处产生了较大的电磁压力,随着宽厚比的增加,窄边受到的电磁力增大. 对于脉冲磁场,研究者们也已经研究了圆柱形铸件中的电磁力分布和铸件流动情况[22,23],但对于其它形状铸件的相关研究和晶粒细化效果尚未见报道. 因此,研究脉冲磁场在非轴对称铸件中的细化效果以及其中的振荡和对流效应,对理解脉冲磁场的细化机理以及扩展脉冲磁场的应用范围有重要的意义.

本工作研究了低压脉冲磁场对K4169高温合金不同宽厚比矩形截面试件的晶粒细化作用,通过有限元模拟计算给出了矩形截面试件中电磁力和流场的分布规律,并结合实验和模拟计算结果分析了试件截面宽厚比对电磁力和流动的影响以及对脉冲磁场晶粒细化效果的影响.

1 实验方法

实验采用K4169高温合金,其主要化学成分(质量分数,%)为: C 0.05, Co 0.01, Ni 52, Mo 3.05, Nb 5.3, Cr 8.4, Al 0.55, Ti 1.05, Fe余量. 首先将经打磨去氧化皮的母合金在真空感应下进行重熔,母合金重熔后升温精炼5 min,待熔体降温至一定温度时进行浇注,并使试件在脉冲磁场作用下凝固,脉冲磁场的频率和激励电压分别为5 Hz及200 V. 脉冲激励线圈为内径260 mm,外径280 mm,高为120 mm的多重绕组环形线圈.

使用预热至一定温度的熔模模具得到矩形截面试件, 截面尺寸分别为42 mm×42 mm, 60 mm×30 mm, 90 mm×20 mm和100 mm×18 mm, 相应的截面宽厚比分别为1.0, 2.0, 4.5和5.5, 高度均为120 mm. 试件中心轴与环形线圈的对称轴重合, 试件底部与线圈底部位于同一水平面. 试件凝固后在距底面15 mm处沿横截面剖开并制备成金相样品, 采用15 g $CuSO_4$+3.5 mL H_2SO_4+50 mL HCl腐蚀剂腐蚀凝固组织. 采用Microtek i800plus光学扫描仪获取凝固组织并观察, 并使用截线法统计平均晶粒尺寸, 在每个横截面上取8条截线, 通过计算截线长度与相交晶界数的比值得到平均晶粒尺寸.

2 模拟计算模型

电磁场模拟计算的控制方程为Maxwell方程组(1)~(4), Lorentz力由式(5)和(6)计算, 流场的控制方程为质量守恒方程(7)及动量守恒方程(8):

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0 \tag{3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{E}=0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B} \tag{6}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v})=0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho\boldsymbol{v})}{\partial t}=-\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v}\boldsymbol{v})-\nabla p-\mu\nabla^2\boldsymbol{v}+\rho F_b \tag{8}$$

式中, $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度矢量, A/m; σ为熔体的电导率, 1.18×10^6 S/m; $\boldsymbol{E}$ 为电场强度矢量, V/m; $\boldsymbol{B}$ 为磁通密度矢量, T; $\boldsymbol{J}$ 为感应电流密度, A/m^2; $\boldsymbol{F}$ 为电磁力密度, N/m^3; ρ为熔体密度, 7900 kg/m^3; t为时间, s; $\boldsymbol{v}$ 为速度矢量, m/s; p为压力, Pa; μ为有效黏度系数, 0.005 kg/(m·s); F_b为包含电磁力在内的总体积力. 材料的物性参数参考纯Ni的物性参数[24].

依据脉冲磁场作用下的凝固实验, 在ANSYS有限元软件中建立相应尺寸的三维有限元模型并作以下假设和简化: (1) 熔体为不可压缩Newton流体, 流动形式为层流; (2) 熔体的电导率和相对磁导率不随温度变化, 熔体的流动不影响电磁场的分布; (3) 不考虑溶质及凝固过程的影响, 熔体的物性参数各向同性且不随时间变化; (4) 不考虑浇注过程对流动的影响. 根据以上假设, 本工作采用磁场-流场单向耦合的方式, 如图1所示, 将脉冲发生器产生的5 Hz激励脉冲电流的波形简化为每个周期由0.005 s上升期 t_a, 0.055 s下降期 t_d 及0.014 s间歇期 t_p 组成的非对称三角波形式的脉冲电流, 激励电流的电流密度在上升期由0线性增加到峰值2×10^7 A/m^2, 下降期由峰值线性减小到0, 间歇期激励电流恒定为0. 3个时期各分成10个子步进行计算. 将激励电流分段加载到磁场分析的线圈单元上, 并在整个模型的外表面施加磁力线平行边界条件, 计算出不同时刻的电磁场和电磁力. 然后将对应节点和单元的电磁力加载到对应时刻的流场模型中, 并在流场模型的外表面施加无滑移壁面边界条件, 计算得到熔体的流场分布及熔体中流速在多个脉冲周期中随时间的变化规律.

为了研究脉冲磁场对不同宽厚比矩形截面试件的细化效果, 针对每种宽厚比的矩形截面试件建立了相应的有限元模型, 其中宽厚比为5.5的矩形截面试件的有限元模型及网格如图2所示. 电磁场模型由中心区域的试件、激励线圈(显示一部分)以及包围整个空间的空气球(未显示)组成. 流场的模型仅为图2中的试件区域. 定义高度方向为Z轴, 宽度方向为X轴, 厚度方向为Y轴. 为兼顾计算效率和

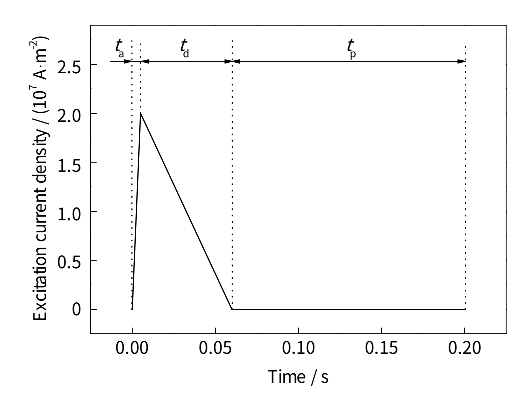


图1 产生脉冲磁场的激励电流单周期波形

Fig.1 Excitation current of pulsed magnetic field in one period (t_a—ascending stage, t_d—descending stage, t_p—pause stage)

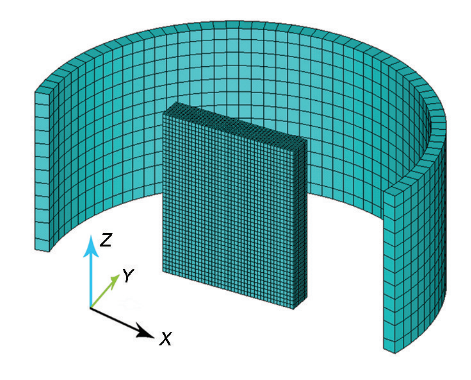


图2 矩形截面试件(宽厚比为5.5)的三维有限元模型及网格划分

Fig.2 3D FEM model and mesh of rectangular sample with aspect ratio of 5.5

计算精度, 熔体区域的网格尺寸设为1~2 mm, 网格数量为10000~20000.

3 结果与讨论

3.1 脉冲磁场作用下不同宽厚比矩形截面试件的晶粒细化

不同宽厚比的K4169高温合金矩形截面试件在有无脉冲磁场作用下的凝固组织如图3所示, 图4给出了相应的平均晶粒尺寸. 结合图3和4可以看出, 不施加脉冲磁场时, 试件的晶粒比较粗大, 平均晶粒尺寸为3~4 mm, 随宽厚比增大, 试件的晶粒尺寸逐渐减小. 这是由于, 当横截面面积一定时, 宽厚比增大使横截面的周长增大, 即与模具接触的散热

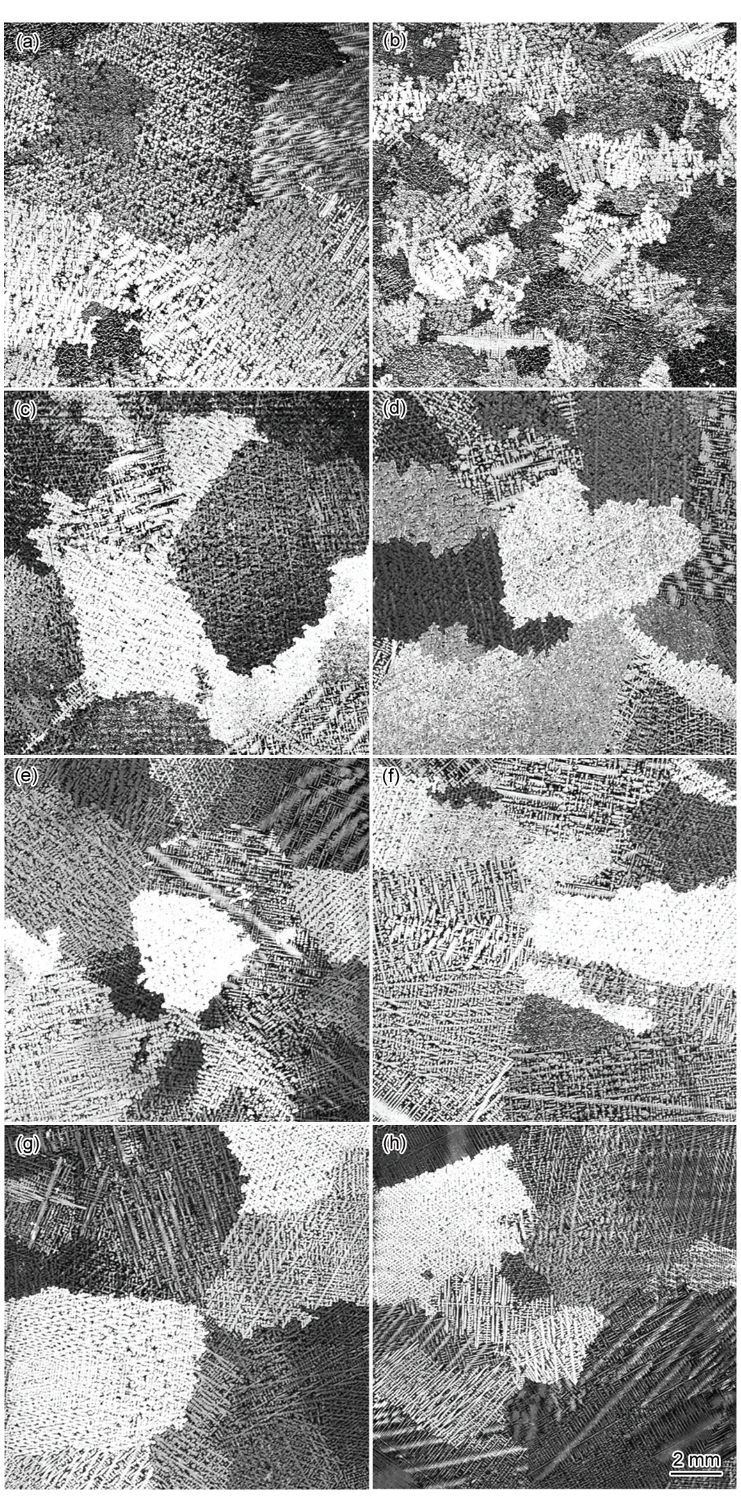


图3 不同宽厚比的K4169高温合金矩形截面试件在有无脉冲磁场作用下的凝固组织

Fig.3 Solidification microstructures of superalloy K4169 rectangular samples without (a, c, e, g) and with (b, d, f, h) pulsed magnetic field under aspect ratios of 1.0 (a, b), 2.0 (c, d), 4.5 (e, f) and 5.5 (g, h)

面积增大, 导致冷却速率提高最终使得晶粒的平均尺寸随试件宽厚比的增大而减小. 施加脉冲磁场后, 不同宽厚比试件的晶粒尺寸都得到一定程度的细化. 其中宽厚比为1.0的试件, 脉冲磁场对凝固组织的细化效果最为明显, 平均晶粒尺寸减小到1.68 mm; 对于宽厚比为2.0, 4.5和5.5的试件, 脉冲磁场作用下平均晶粒尺寸略有减小. 即在相同脉冲磁场的作用下, 宽厚比较大的矩形试件细化效果较弱.

3.2 脉冲磁场作用下熔体中的电磁力

以宽厚比为1.0的试件为例说明磁感应强度、感应电流及电磁力在熔体中的分布规律. 当激励电流达到上升期的峰值和下降期中点时, 熔体中的磁感应强度分布分别如图5a和b所示(中间方框表示熔体区域, 两侧的方框表示线圈区域). 可以看出, 熔体中磁感应强度矢量方向相同, 基本平行于Z方向, 熔体两侧的磁感应强度较大. 熔体中的感应电流分

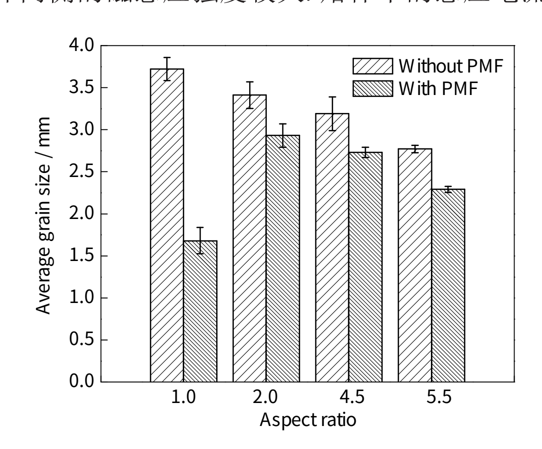


图4 不同宽厚比的K4169矩形截面试件在有无脉冲磁场作用下的平均晶粒尺寸

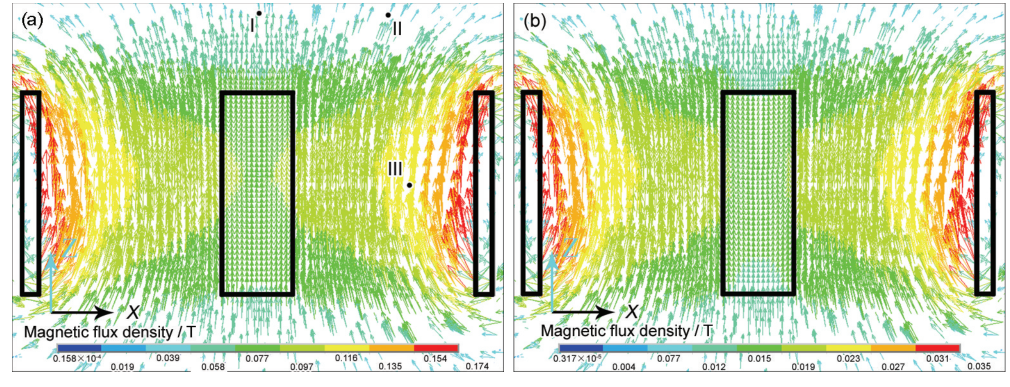
Fig.4 Average grain size of K4169 rectangle samples with different aspect ratios without and with pulsed magnetic field (PMF)

布计算结果分别如图6a和b所示, 其中右上角小图为中心横截面上的感应电流分布. 可以看出, 脉冲磁场在熔体中产生环向的感应电流, 激励电流上升期熔体中感应电流环流的方向与下降期相反. 熔体中的电磁力分布如图6c和d所示, 其中右上角小图为中心横截面上的电磁力. 在激励电流上升期, 熔体受到指向中心轴的压力, 在激励电流的下降期, 熔体受到指向熔体侧表面的拉力. 脉冲磁场作用下, 熔体受到周期性压-拉的电磁力作用, 从熔体的中心到侧表面, 电磁力逐渐增大. 为验证电磁场计算结果, 使用标准特斯拉计测量了图5a中位置I, II和III处峰值磁感应强度Z轴方向分量, 计算结果与测量结果如表1. 可见, 有限元计算结果与实测结果基本一致.

为了研究脉冲磁场在宽厚比不同的矩形试件中产生的电磁力, 统计了在外加激励电流峰值时刻, 不同宽厚比模型中所有单元电磁力密度的最大值及平均值, 如图7所示. 试件中的电磁力密度的平均值和最大值随着宽厚比的增大均呈现减小的趋势; 宽厚比为5.5的矩形试件, 其最大电磁力密度和平均电磁力密度分别为宽厚比为1.0矩形试件的0.7倍和0.6倍. 这是由于, 虽然截面的面积不变, 通过截面的磁通量及磁通量的变化率接近, 感应电动势相近, 但截面宽厚比的改变使得感应电流所在的闭合回路的形状发生变化. 即对于宽厚比较大的试件, 其每一圈感应电流的环流对应的闭合回路较长, 总电阻较大, 感应电流较小, 而电磁力密度为磁感应强度与电流密度的乘积, 因此宽厚比较大的试件受到的电磁力较小.

3.3 脉冲磁场作用下的熔体流动

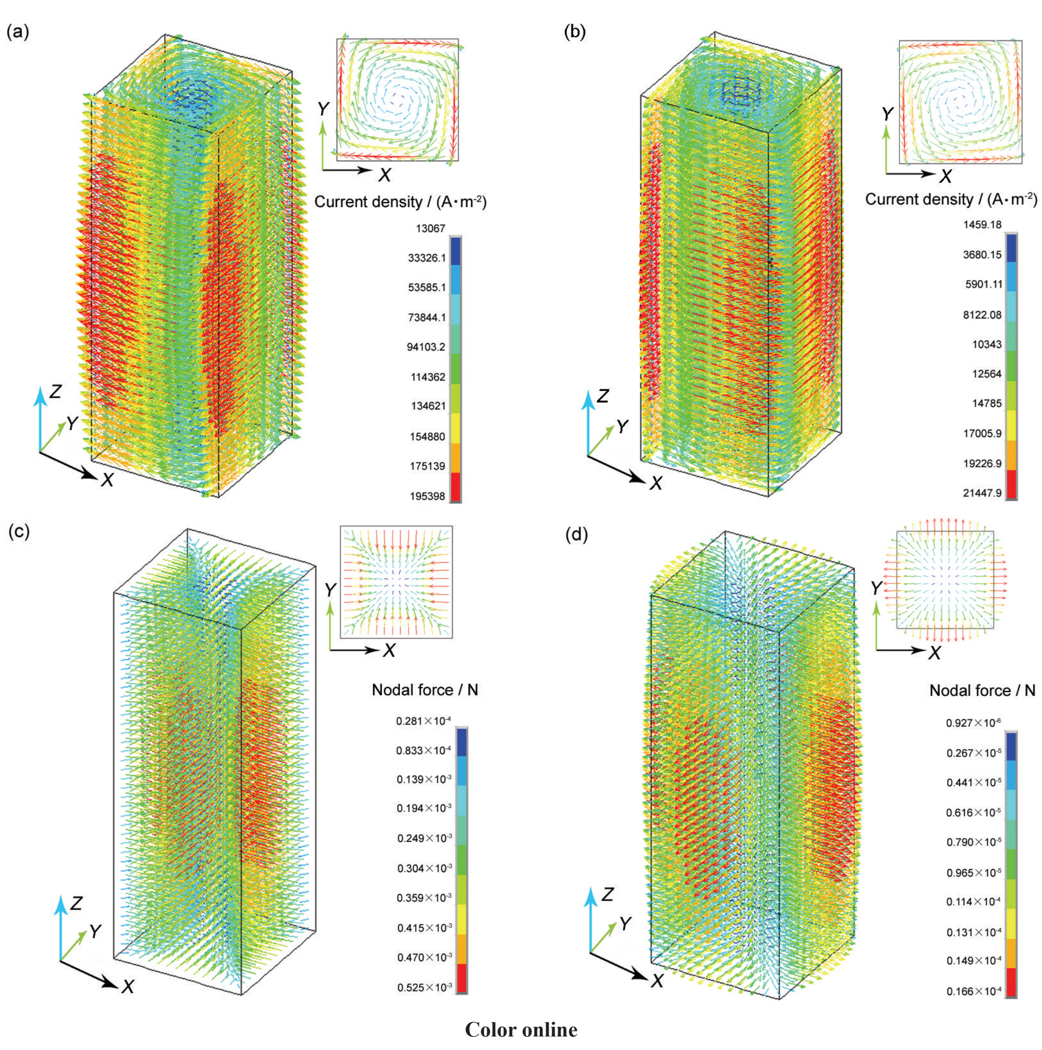
由于电磁力表现为周期性振荡的特征, 因此,



Color online

图5 激励电流峰值时刻及下降期空间磁感应强度的分布

Fig.5 Distributions of magnetic flux density at peak value of excitation current (a) and descending stage of excitation current (b)



Color online

图6　激励电流峰值时刻和激励电流下降期的感应电流密度和电磁力的分布(各小图为中心横截面上相应的分布)

Fig.6 Distributions of induced current density (a, b) and electromagnetic force (c, d) at peak value of excitation current (a, c) and descending stage of excitation current (b, d) (Detailed figures in the upper right corner show the corresponding distributions on the middle transverse section)

表1　图5a中位置I, II和III处磁感应强度Z方向分量的计算值与实测值

Table 1 Calculated and measured Z-component of magnetic flux density at positions I, II and III in Fig.5a

(T)

Position	Calculated	Measured
I	0.056	0.052
II	0.051	0.048
III	0.134	0.128

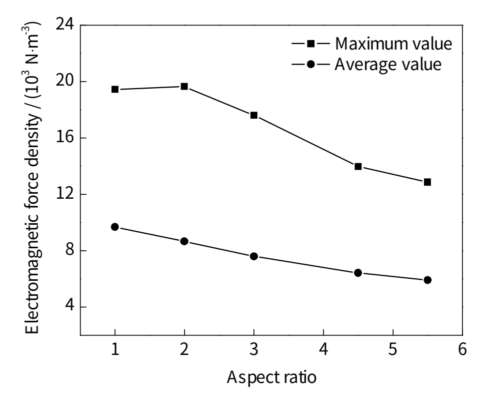


图7　不同宽厚比矩形试件中的最大电磁力密度与平均电磁力密度

Fig.7 Maximum and average electromagnetic force densities in rectangular samples with different aspect ratios

电磁力引起熔体流动的流速的大小和方向也随时间变化. 多个周期中, 宽厚比为1.0的矩形截面试件中心轴高度75 mm处节点的流速在40 s内的变化规律如图8所示, 其中第25~26 s的5个脉冲周期内节点的流速如图8中插图所示. 可以看出, 熔体的流速呈现2个特征. 第一, 流速呈现脉冲的特征, 这是由于脉冲磁场由上升期、下降期和间歇期组成: 在上升期熔体的流速逐渐增大; 在下降期, 电磁力的方

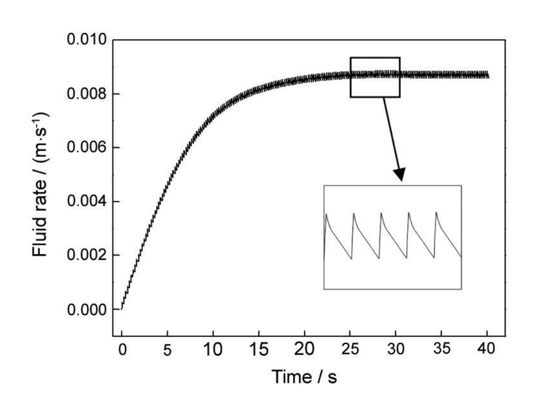
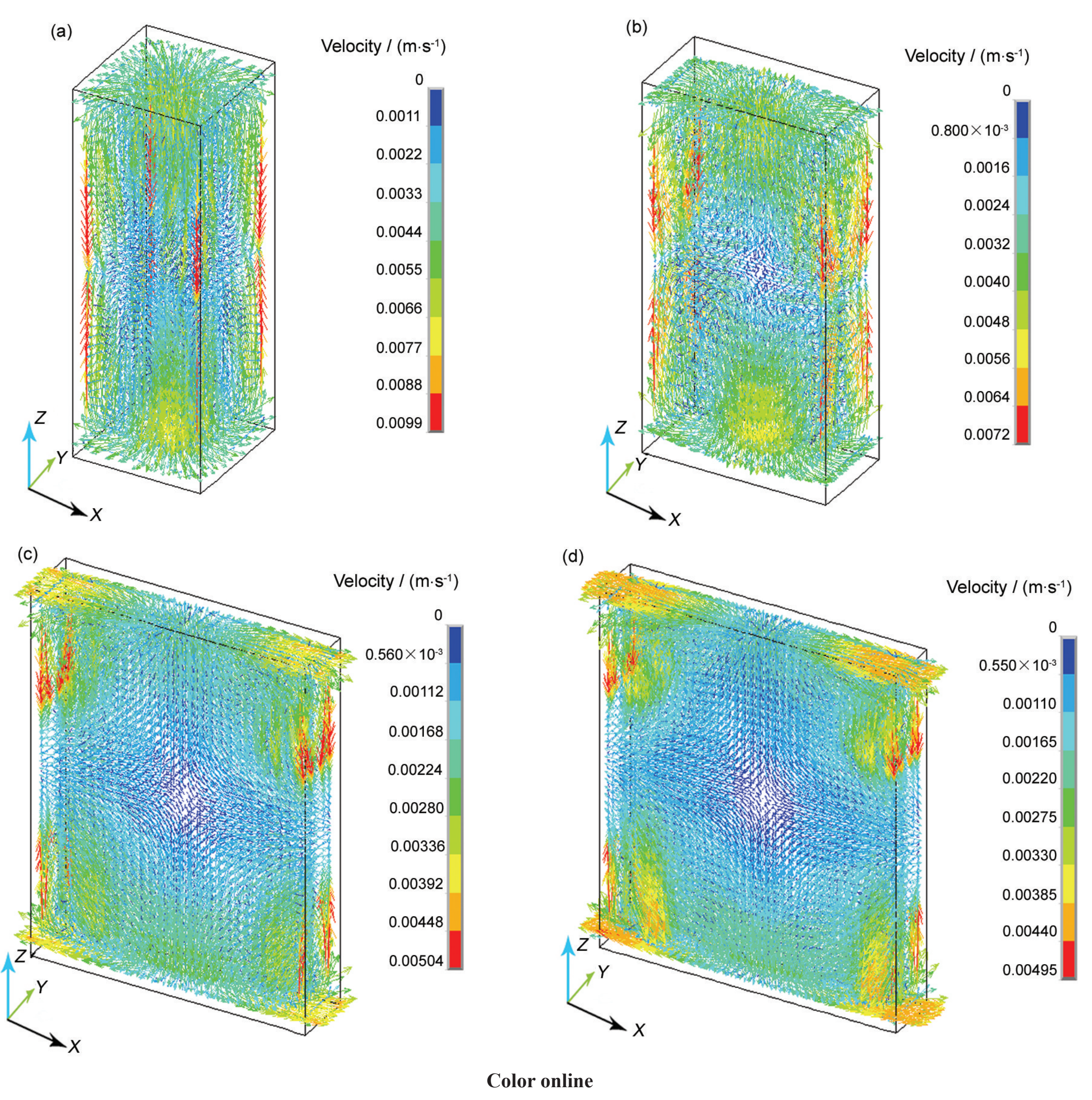


图8 宽厚比为1.0的试件中心轴高度75 mm处的节点流速随时间的演变规律

Fig.8 Evolution of fluid rate at 75 mm height on central axis of the sample with aspect ratio of 1.0 (Inset shows the fluid rate in 5 pulse periods between 25 s and 26 s)

向恰好与上升期相反, 熔体流速逐渐减小; 在间歇期, 电磁力很小, 熔体的流速受黏滞力影响而略有减小. 第二, 熔体中流速是一个逐渐发展的过程, 由于熔体在上升期受到的电磁力远大于下降期, 因此开始时流速随时间延长逐渐增大, 经历一段时间之后, 流速增大导致黏滞力增大, 流速在下降期和间歇期的减小量恰好等于在上升期的增量, 熔体的流动趋于稳定, 即在每个周期的开始时刻, 熔体同一位置的流速的大小和方向均相同. 从图8中可以看出, 在第25 s时, 已经经历125个脉冲周期, 熔体中流动已相对稳定.

图9给出了第25 s时不同截面宽厚比试件中熔体流速的矢量图. 可以看出, 不同宽厚比的熔体流动形式都呈现出环流的形式. 从图8可知, 熔体的流



Color online

图9 第25 s时不同截面宽厚比下脉冲磁场在熔体中产生的流动矢量图

Fig.9 Fluid patterns under pulsed magnetic field in rectangular samples with aspect ratio of 1.0 (a), 2.0 (b), 4.5 (c) and 5.5 (d) at 25 s

动主要是由上升期的电磁力驱动. 宽厚比较小的试件(图9a)中, 中心水平面上的熔体受到图6c中指向熔体中心的电磁力而向内运动, 四周熔体流向正中心并分别向上下底面流动, 触碰底面之后沿底面向外运动, 到达4个侧面后形成洄流, 上、下2部分的洄流在熔体中心水平面汇流, 最终形成环流形式的流动. 且熔体4个侧表面流速大小相近. 随着宽厚比的增大, 熔体在宽面形成的洄流的流速明显小于窄边形成的洄流. 宽厚比为5.5的试件(图9d)中, 熔体宽面的洄流受到从熔体中心向上、下底面流动的影响, 汇入窄面的洄流中. 因此, 熔体宽面的流速明显小于窄面的流速.

图10为第25 s时不同宽厚比模型中所有节点流速的最大值与平均值. 随着截面宽厚比的增大, 熔体流动流速的最大值及平均值均逐渐减小. 在宽厚比为5.5的矩形试件中, 熔体中的最大流速和平均流速均为宽厚比为1.0试件中的0.4倍. 这是由于随宽厚比增大, 熔体受到的电磁力减小, 受迫流动的驱动力也就相应减小. 并且由于熔体流动为环流形式, 宽厚比较大的熔体形状对环流的约束更大. 因此在宽厚比较大的试件中, 熔体的流速较慢.

3.4 细化机理分析

对于脉冲磁场细化凝固组织的机理, 目前一般认为主要是模壁激冷晶核游离和枝晶臂破碎2种机制[6,13,14,25]. 在脉冲磁场作用下, 周期性变化的电磁力在熔体中产生振荡和对流, 可促使模壁激冷晶核游离或枝晶臂破碎并随熔体流动分散于整个熔体中形成新的晶核核心, 从而引起铸锭凝固组织的整体细化. Ma等[26]在IN718合金凝固不同阶段施加脉冲磁场, 结果表明, 脉冲磁场的细化作用主要在凝固初期的形核阶段, 这与Li等[27]在Al-Cu合金中的实验结果一致. Ma等[26]进一步通过筛网实验发现, 在脉冲磁场作用下, 筛网与模壁之间的合金凝固组织得到了明显细化, 而筛网内的合金凝固组织细化效果较差, 从而认为脉冲磁场促进模壁晶核脱落和游离是导致晶粒细化的主要原因. 本工作模拟结果表明, 脉冲磁场作用下熔体边部受到较大的电磁力并且存在着熔体流动, 可对模壁晶核形成振荡或冲刷致其脱落和游离, 同时脉冲磁场产生的对流作用可促使游离晶核在熔体中均匀分布, 在它们的综合作用下, 熔体内有效晶核增加. 因而, 在脉冲磁场的作用下, 不同截面宽厚比试件的凝固组织都得到了不同程度的细化.

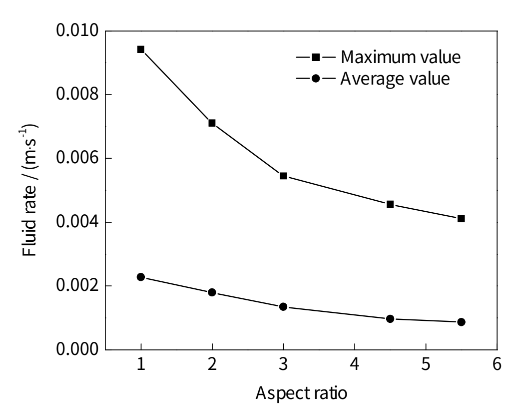


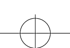
图10 不同宽厚比矩形试件中的最大流速与平均流速

Fig.10 Maximum and average fluid velocities in rectangular samples with different aspect ratios

脉冲磁场对矩形试件凝固组织的细化效果随其宽厚比增大而减弱, 其原因主要是熔体受力和流动的改变. 根据模拟结果, 一方面, 在相同强度的脉冲磁场作用下, 试件截面宽厚比为1.0时, 熔体的平均电磁力和平均流速最大(图7和10), 电磁振荡和对流作用最强, 因而对试件的细化效果最好; 随着试件截面宽厚比的增大, 试件中的平均电磁力和平均流速逐渐减弱, 即产生的电磁振荡和对流作用减弱, 不利于模壁激冷晶核的游离、枝晶臂的破碎及这些异质晶核分散. 这与文献[13]中外加磁场强度的降低会导致圆柱形试件细化效果减弱的结果在原理上是一致的. 另一方面, 不同宽厚比的矩形试件熔体受迫流动形式有所差别. 宽厚比较小的试件(图9a), 熔体侧表面的流速分布比较均匀, 模壁上形成的晶核都受到较强的冲刷作用; 而截面宽厚比较大的试件(图9d), 宽面流速较小, 窄面流速较大, 但宽面恰恰具有很大的表面积, 可以提供大量的模壁激冷晶核, 此流动形式不利于模壁激冷晶核的游离以及分散. 这2方面原因共同导致了脉冲磁场对宽厚比较大试件的晶粒细化效果减弱(图3). 因此, 对于宽厚比较大的试件, 采用环形线圈的细化效果比较有限, 如果优化激励线圈设计并改变脉冲磁场参数及作用方式, 以获得较大的电磁力和较强的熔体流动以及有利于模壁冲刷的熔体流动形式, 则可提高脉冲磁场对较大宽厚比试件的细化效果.

4 结论

(1) 脉冲磁场作用下凝固K4169高温合金矩形试件的晶粒得到不同程度细化, 在相同脉冲磁场的作用下, 宽厚比较小的矩形试件细化效果较强. 当试件截面宽厚比为1.0时, 脉冲磁场的晶粒细化效果最显著, 当试件截面宽厚比为2.0, 4.5和5.5时, 脉冲磁场的晶粒细化效果较弱.



(2) 模拟计算结果表明, 脉冲磁场作用下K4169高温合金熔体受到周期性压-拉的电磁力而产生环流. 熔体流速在脉冲磁场上升期逐渐增大, 在下降期和间歇期逐渐减小, 呈现出脉冲特征. 截面宽厚比较小的试件, 4个侧表面的流速大小相近; 而宽厚比较大的试件, 熔体宽面的流速明显小于窄面的流速.

(3) 在相同脉冲磁场作用下, 不同截面宽厚比矩形试件中的电磁力和流动强度差别较大. 截面的宽厚比从1.0增大到5.5时, 试件受到的最大电磁力减小约30%, 平均电磁力减小约40%; 试件的最大流速和平均流速减小约60%.

参考文献

[1] Reed R C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. New York: Cambridge University Press, 2006: 247

[2] Chen R Z, Wang L B, Li J H. *J Aero Mater*, 2000; 20(1): 55
(陈荣章, 王罗宝, 李建华. 航空材料学报, 2000; 20(1): 55)

[3] He S X, Wang J. *Hot Working Technol*, 2013; 42(21): 5
(何树先, 王 俊. 热加工工艺, 2013; 42(21): 5)

[4] Asai S. *Sci Technol Adv Mater*, 2000; 1: 191

[5] Vives C. *Metall Trans*, 1989; 20B: 623

[6] Zi B T, Ba Q X, Cui J Z, Xu M G. *Scr Mater*, 2000; 43: 377

[7] Gao Y L, Li Q S, Gong Y Y, Zhai Q J. *Mater Lett*, 2007; 61: 4011

[8] Wang B, Yang Y S, Zhou J, Tong W. *J Mater Sci Technol*, 2011; 27: 176

[9] Wu H J, Wei N, Bao Y P, Wang G X, Liu J J, Du J X. *Foundry Technol*, 2011; 32: 321
(吴华杰, 魏 宁, 包燕平, 王国新, 留津津, 杜建新. 铸造技术, 2011; 32: 321)

[10] Jin W Z, Li J, Li T J, Yin G M. *J Vac Sci Technol Sin*, 2008; 28(6): 579
(金文中, 李 军, 李廷举, 殷国茂. 真空科学与技术学报, 2008; 28(6): 579)

[11] Jin W Z, Bai F D, Li T J, Yin G M. *Mater Lett*, 2008; 62: 1585

[12] Jia P, Wang E G, Lu H, He J C. *Acta Metall Sin*, 2013; 49: 1573
(贾 鹏, 王恩刚, 鲁 辉, 赫冀成. 金属学报, 2013; 49: 1573)

[13] Ma X P, Li Y J, Yang Y S. *J Mater Res*, 2009; 24: 2670

[14] Li Y J, Ma X P, Yang Y S. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2011; 21: 1277

[15] Ma X P, Li Y J, Yang Y S. *J Mater Res*, 2009; 24: 3174

[16] Vives C. *Metall Trans*, 1985; 16B: 377

[17] Yu Y D, Li C X. *Mater Des*, 2013; 44: 17

[18] Zhang H T, Nagaumi H, Zuo Y B, Cui J Z. *Mater Sci Eng*, 2007; A448: 189

[19] Zhang H T, Nagaumi H, Zuo Y B, Cui J Z. *Mater Sci Eng*, 2007; A448: 177

[20] Ren B Z, Zhu M Y, Wang H D, Chen Y. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 507
(任兵芝, 朱苗勇, 王宏丹, 陈 永. 金属学报, 2008; 44: 507)

[21] Yu J W, Shen J, Lu B P, Fu H Z. *Chin J Nonferrous Met*, 2004; 14: 1494
(俞建威, 沈 军, 卢百平, 傅恒志. 中国有色金属学报, 2004; 14: 1494)

[22] Zi B T, Yao K F, Wang H, Liu W J, Cui J Z, Xu G M, Ba Q X. *Rare Met Mater Eng*, 2002; 31: 334
(訾炳涛, 姚可夫, 王 辉, 刘文今, 崔建忠, 许光明, 巴启先. 稀有金属材料与工程, 2002; 31: 334)

[23] Wang B, Yang Y S, Ma X P, Tong W H. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010; 20: 283

[24] Takamichi I, Roderick I. Translated by Xian A P, Wang L W. *The Physical Properties of Liquid Metals*. Beijing: Science Press, 2006: 73, 204, 256
(Takamichi I, Roderick I著, 冼爱平, 王连文 译. 液态金属的物理性能. 北京: 科学出版社, 2006: 73, 204, 256)

[25] Li M J, Tamura T, Miwa K. *Acta Mater*, 2007; 55: 4635

[26] Ma X P, Li Y J, Yang Y S. *J Mater Res*, 2009; 24: 3174

[27] Li Y J, Tao W Z, Yang Y S. *J Mater Process Technol*, 2012; 212 : 903

(责任编辑:肖素红)

